

Artículo

**Rehabilitación térmica de la envolvente edilicia de edificios en altura.
Un caso en Tucumán, Argentina
High-rise building envelope Energy Efficient Retrofitting.
A case in Tucumán, Argentina**

Amalita Fernández*

Universidad Nacional de Tucumán / CONICET
afernandez@herrera.unt.edu.ar

Beatriz Garzón**

Universidad Nacional de Tucumán / CONICET
bgarzon06@gmail.com

Fecha de envío: 14 de marzo de 2023
Fecha de aceptación: 15 de diciembre de 2023
Fecha de publicación: febrero 2024

Disponible en: <https://doi.org/10.24215/24226483e130>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

* Arquitecta graduada de la Universidad Nacional de Tucumán (FAU UNT; 2017). Doctoranda en Universidad Nacional de Salta (Doctorado en Ciencias- Área Energías Renovables). Becaria doctoral CONICET. Participa de proyectos FAU-SCAIT UNT, CONICET y MinCyT sobre Hábitat Sustentable y Saludable en el Norte Grande Argentino. Docente auxiliar graduada en FAU UNT- Cátedra de Acondicionamiento Ambiental II. <https://orcid.org/0000-0002-5848-2685>

Afiliación: Instituto de Acondicionamiento Ambiental. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad Nacional de Tucumán / CONICET.

** Arquitecta egresada de la Universidad Nacional de Tucumán (FAU-UNT). Doctora en Ciencias de la Universidad Nacional de Salta (Área Energías Renovables). Especialista en Gerencia y Vinculación Tecnológica de la UNT. Directora del GHabSS, FAU UNT – CONICET. Investigadora Independiente CONICET. Directora de Proyectos FAU-SCAIT UNT, CONICET y MinCyT sobre Hábitat Sustentable y Saludable en el Norte Grande Argentino. Profesora Asociada a cargo de la Cátedra de Acondicionamiento Ambiental II de FAU UNT. <https://orcid.org/0000-0003-3130-8895>

Afiliación: Instituto de Acondicionamiento Ambiental. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad Nacional de Tucumán / CONICET.

Resumen: El presente trabajo desarrolla una propuesta de rehabilitación térmico-energética para unidades habitacionales de un edificio de viviendas. El mismo consiste en un edificio en altura ubicado en la ciudad de San Miguel de Tucumán, Argentina. Con esta rehabilitación, se busca generar mejores condiciones de habitabilidad de manera sostenible. Para verificar las mejoras generadas a partir de la implementación de la propuesta, se analiza el comportamiento térmico de ambos casos (original y con propuestas de mejora) de manera comparativa. Este análisis se realiza a partir de tres modelos de balance térmico: modelo estacionario, modelo estacionario con corrección dinámica y modelo dinámico. Se concluye que las prestaciones energéticas del caso original, resultan deficientes y se logra una importante mejora tras la implementación de estrategias de rehabilitación. Este trabajo permite idear una serie de lineamientos que pueden aplicarse en edificios en altura existentes.

Palabras clave: vivienda colectiva, rehabilitación de la envolvente, eficiencia energética

Abstract: This work develops a thermal-energy rehabilitation proposal for residential units of a residential building. It consists of a high-rise building located in San Miguel de Tucumán, Argentina. This rehabilitation, seeks to generate better living conditions in a sustainable manner. To verify the improvements generated from the proposal implementation, the thermal behavior of both cases (original and with improvement proposals) is analyzed comparatively. This analysis is carried out based on three thermal balance models: stationary model, stationary model with dynamic correction and dynamic model. It is concluded that the energy performance of the original case is deficient and a significant improvement is achieved after the implementation of rehabilitation strategies. This work allows us to devise a series of guidelines that can be applied in existing high-rise buildings.

Key words: collective housing, envelope rehabilitation, energy efficiency

1. Introducción

Las edificaciones constituyen un sector de enorme influencia en la evolución del consumo de energía y las emisiones de CO₂ (Urteneche, et al. 2021). Los edificios representan el 36% de las emanaciones de dióxido de carbono y del 40 % del consumo energético total en el mundo (Rivero Camacho, et al. 2018). En Argentina, el 37 % del consumo energético es responsabilidad del sector edilicio (Kuchen y Kozak, 2021). Se estima que el 80 % de la energía total que utiliza un edificio se consume durante su vida útil, mientras que el 20 % restante se consume durante la extracción/fabricación de sus materiales y la ejecución de la obra. Además, los países con climas templados y cálidos suelen presentar una mayor ineficiencia energética, ya que la calidad de la construcción en general, es deficiente y aún no ha sido integrada la eficiencia energética al proceso de construcción de edificios, evidenciando un mayor potencial de ahorro (Viegas et al. 2020).

En la actualidad, la vivienda en altura constituye la forma de agrupamiento más emblemática de la especulación inmobiliaria moderna (Cutroneo, 2012). En San Miguel de Tucumán, desde 2004 se construyen anualmente en promedio 75 edificios en altura entre las cuatro avenidas (Guijarro, et al. 2012). El crecimiento en densidad de los centros urbanos se realiza gracias a las edificaciones en altura. La problemática del confort ambiental de dichas edificaciones en nuestras ciudades adquiere a diario mayor importancia. Los cambios que se generan por el incremento de la masa construida y los efectos de la especulación del mercado inmobiliario en la calidad de los materiales que constituyen la envolvente, influyen directamente en el confort ambiental urbano e interior de los mismos con dos consecuencias directas: la disminución de la calidad de vida de sus ocupantes y el incremento en el consumo energético de los edificios (Guijarro, et al. 2012).

Existe un gran potencial para mejorar el rendimiento energético y reducir las emisiones contaminantes mediante la rehabilitación del parque de edificios existente. Esto se debe a la baja tasa de renovación de los mismos, ya que presentan una vida útil de 50 a más de 100 años, y el elevado número de edificios ya existentes. De hecho, mejora se centra en la implantación de medidas de rehabilitación en un edificio existente, con el objetivo de reducir la demanda energética total, manteniendo, o incluso mejorando, los niveles requeridos de confort térmico de los ocupantes

(Kolaitis et al, 2013). Las medidas de rehabilitación energética más comúnmente aplicadas son la instalación de aislamiento térmico, la limitación de puentes térmicos, la sustitución de superficies vidriadas, la mejora de la estanqueidad al aire del edificio y la introducción de ventilación mecánica con recuperación de calor (Tommerup, 2006; Nikolaidis, 2009). Existen numerosos estudios centrados en la investigación del impacto de las medidas de rehabilitación energética en la conservación de energía y la reducción de emisiones. Un hallazgo común en la mayoría de estos estudios es que se pueden anticipar ahorros de energía significativos mediante la implementación vigorosa de estas medidas; entre ellas, la instalación de aislamiento térmico sigue siendo el medio disponible más importante para mejorar el comportamiento energético de un edificio (Papadopoulos, 2005).

El objetivo del presente trabajo consiste en efectuar propuestas de rehabilitación en un edificio de viviendas para disminuir el impacto ambiental y mejorar las condiciones de habitabilidad de sus usuarios reduciendo el consumo energético.

2. Metodología

La metodología del presente trabajo consiste íntegramente en técnicas cuantitativas de análisis y evaluación. Las mismas se aplican en el estudio de las unidades de la planta tipo de un edificio en altura de viviendas existentes y su propuesta de rehabilitación térmica. Se analiza, concretamente, el comportamiento térmico en base a tres modelos: estacionario, estacionario con corrección dinámica y dinámico, de ocho unidades habitacionales en un edificio de viviendas. A continuación, se describen las herramientas metodológicas aplicadas a cada modelo.

2.1. Modelo estacionario:

Se analizan distintas variables expresadas en el paquete normativo IRAM 11600, referidos al comportamiento térmico de las unidades y de su envolvente. Concretamente se analiza: Coeficiente de transmitancia térmica K, puentes térmicos, riesgos de condensación, coeficiente volumétrico de calefacción y coeficiente volumétrico de refrigeración. Para ello se utilizan las siguientes herramientas:

- CIDEE-EA. Denominado Calculador Integral de Eficiencia Energética de la Envolvente Arquitectónica. Es un calculador, desarrollado por Fernández et al. (2019) el cual incorpora los cálculos expresados en las normas IRAM 11601;

11605; 11604 y 11659-2. Esta herramienta unifica todos estos valores en y simplifica los diferentes procesos de cálculo. CIDEE-EA es diseñado para la zona bioclimática II, sub-zona a o b en su totalidad, pero puede servir, de manera parcial, para el resto de las zonas de la República Argentina; cabe destacar que San Miguel de Tucumán pertenece a la zona IIb (Elsinger et al. 2020).

- C-RC. Denominado Calculador de Riesgos de condensación. Es un calculador basado en las normas IRAM 11625 que permite verificar riesgos de condensación tanto superficiales como intersticiales. Permite obtener el valor numérico de la temperatura en las distintas capas de la envolvente (techos y muros) y la temperatura del punto de rocío; efectúa una comparación entre ambos y devuelve el valor VERIFICA o NO VERIFICA. Este calculador también arroja un gráfico de líneas donde se comparan las temperaturas y se puede verificar de manera rápida y visual los riesgos de condensación.

2.2. Modelo estacionario con corrección dinámica:

Consiste en modelos estacionarios que mediante ajustes globales logran compensar y corregir el comportamiento del sistema para tener en cuenta los efectos dinámicos. La herramienta utilizada para dicho análisis es el *Etiquetado de viviendas*, basada en la Norma IRAM 11900:2017. Se trata de una herramienta informática en línea que permite a los profesionales evaluar las prestaciones energéticas de una vivienda a partir de un relevamiento. Se obtiene, como resultado, la etiqueta de Eficiencia Energética (EE) conforme los procedimientos oficiales de alcance nacional. Además, se posibilita evaluar posibles mejoras y cuantificar el impacto de las mismas en términos de potenciales ahorros. Este aplicativo, clasifica la EE de la vivienda en siete categorías a través del Índice de Prestaciones Energéticas (IPE), un valor característico del inmueble, expresado en kWh/m²año. El mismo representa el requerimiento teórico de energía primaria para satisfacer las necesidades de calefacción en invierno, refrigeración en verano, calentamiento de agua sanitaria e iluminación, durante un año y por metro cuadrado de superficie, bajo condiciones normalizadas de uso (Secretaría de Energía, 2018). En el valor IPE inciden distintas variables de diseño. Ellas son: orientaciones, materialización de la envolvente, características de las aberturas, terminación de superficies exteriores e interiores, altura piso-techo, elementos de sombreado, artefactos de iluminación y tipo de

accionamiento, características de los equipos de climatización, sistema de calentamiento de agua, uso de energía fotovoltaica y calentamiento de agua con energía solar.

2.3. Modelo dinámico:

Se realiza una simulación térmica para conocer el comportamiento térmico de las distintas unidades y para evaluar la situación de confort. La primera simulación se realiza a partir del software Energy plus y el confort térmico se evalúa a partir del software SIMEDIF según el estándar ASHRAE 55.

- Energy plus. Este software de simulación permite un análisis exhaustivo del comportamiento térmico-energético de un edificio (Mercado et al. 2011). La versión empleada en el presente estudio es Energy-Plus (versión 4.0.0.024) (Department of Energy, USA, 2009). El mismo ha sido desarrollado por el departamento de Energía de Estados Unidos a partir de códigos de BLAST y DOE2 e incorpora algoritmos como WINDOW 5.0, COMIS, TRNSYS Y SPARK (DOE, 2004) (Scarduelli et al, 2009). Energy Plus ofrece al usuario la posibilidad de seleccionar numerosas variables de salida. Los datos requeridos de entrada al programa son: la caracterización geométrica, las características de sus componentes constructivos, las condiciones meteorológicas y las cargas internas, permitiendo además representar con gran nivel de detalle el uso intermitente de cualquier edificio (Mercado et al. 2011).
- SIMEDIF. La versión utilizada para Windows, es diseñada por la Dra. Silvana Flores Larsen en el INENCO (Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional, U.N.Sa.-CONICET), con un módulo de cálculo en Python (ingreso de datos en VBasic). La versión primitiva de 1984 para DOS fue realizada por los Dres. Graciela Lesino, Luis Saravia y Dolores Alía (Laboratorio de edificios bioclimáticos, en línea). Es un software que sirve como herramienta para simular el comportamiento térmico de edificios y el nivel de confort térmico según el estándar ANSI/ASHRAE55. Este estándar permite estimar la sensación de confort mediante el PMV (Voto Medio Predicho) y el PPD (Porcentaje de Personas Insatisfechas). El método analítico calcula ambas variables en base al índice de arropamiento, la tasa metabólica, la velocidad de aire, la temperatura operativa y la humedad. El método que predice el PMV refleja el valor medio de los votos emitidos por un grupo numeroso de personas respecto de una escala psicofísica de siete niveles

al ser sometidos a diferentes ambientes térmicos. Esta escala va desde: frío ($PMV < -2,5$), fresco ($-2,5 < PMV < -1,5$), ligeramente fresco ($-1,5 < PMV < -0,5$), neutral ($-0,5 < PMV < 0,5$), ligeramente cálido ($0,5 < PMV < 1,5$), cálido ($1,5 < PMV < 2,5$), caliente ($PMV > 2,5$). La zona de confort establece las condiciones en las que el 80% de las personas, en actividad sedentaria o de actividad ligera, encuentran el ambiente térmicamente aceptable.

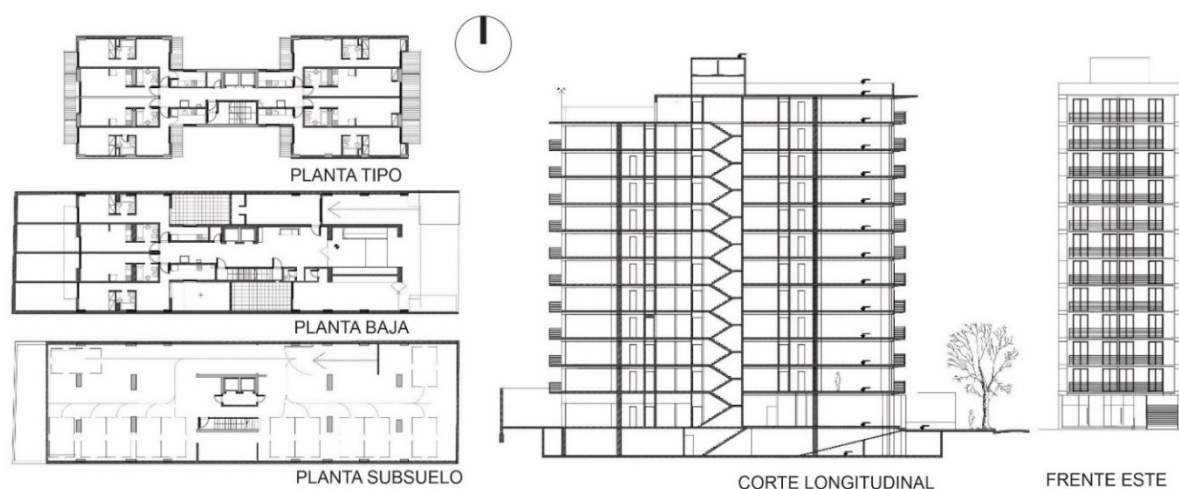
3. Resultados

3.1. Caracterización caso de estudio

El caso de estudio considerado, consiste en ocho unidades habitacionales de la planta tipo de un edificio en altura ubicado en la ciudad de San Miguel de Tucumán. El mismo se construyó entre el año 2013 y el 2018. Consiste en un edificio de viviendas, se encuentra en la zona central de la ciudad, en Barrio Sur.

Se trata de un edificio de 11 pisos, planta baja y subsuelo. El mismo se constituye entre medianeras, con un eje principal en sentido norte-sur, y su fachada orientada hacia el este. Las orientaciones norte y sur configuran las medianeras, se abren patios de ventilación en ellas.

Figura 1. Planimetría completa del caso de estudio



Fuente: elaboración propia.

La planta baja, cuenta con cuatro departamentos hacia el contrafrente, dos monoambientes centrales y dos de un dormitorio hacia las medianeras. Las plantas tipo, del piso 1 al 10, se configuran con ocho departamentos cada uno, cuatro monoambientes (unidades B, C, F y G) y cuatro de un dormitorio (unidades A, D, E y H) orientados hacia frente y contrafrente. El piso 11 solo presenta cuatro departamentos hacia el frente, dos monoambientes y dos unidades de un dormitorio, y una terraza libre hacia el fondo, la cual no es accesible.

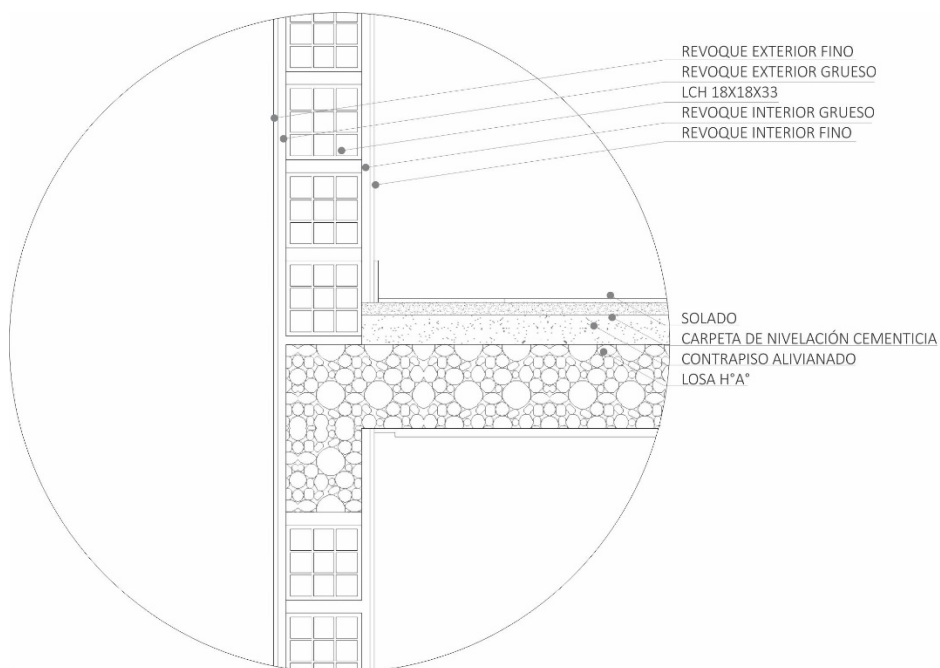
Figura 2. Planimetría planta tipo.



Fuente: elaboración propia.

En cuanto a su materialización, el edificio se resuelve con una estructura portante de hormigón armado, la cual consiste en elementos de carga puntual (columnas) y lineal (tabiques). Dicha estructura responde a la reglamentación sismorresistente vigente, ya que la ciudad de SMT se encuentra en la zona sísmica 2. Los cerramientos verticales exteriores (CVE) son de ladrillo cerámico hueco de 18 cm de espesor revocados en ambas caras, en algunos sectores de la fachada se coloca un revestimiento que simula ser ladrillo a la vista. Los tabiques divisorios interiores de cada unidad y que dividen unidades entre sí, son de ladrillo cerámico hueco de 12 cm revocados en ambas caras. Las ventanas y puerta balcón son todas de abrir, resueltas íntegramente en madera (marco y hoja), con vidrio simple de 4mm.

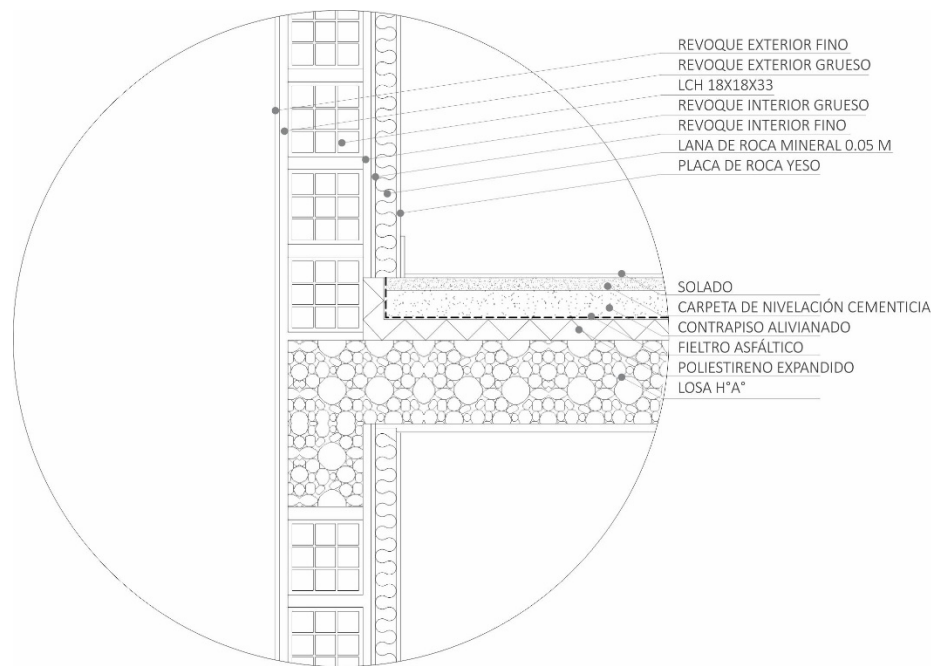
Figura 3. Detalle constructivo CVE y entrepiso de caso original.



Fuente: elaboración propia.

3.2. Descripción de la propuesta de rehabilitación

Se propone incorporar mayor aislación térmica en todos los elementos que la componen, a fin de mejorar las prestaciones térmico-energéticas con el menor impacto ambiental posible. Para el CVE, la propuesta consiste en colocar una capa de 0,05m de lana de roca mineral hacia el interior y una capa de placa de yeso cartón. La estructura resistente de dicha solución, se llevará a cabo con listones de madera de pino de 2x2". En cuanto a los entrepisos, se propone incorporar un aislante encima de la losa. Consiste en una plancha de poliestireno expandido de 5 cm de espesor. Para las carpinterías, se opta por reemplazar las existentes por unas con doble vidrioado hermético.

Figura 4. Detalle constructivo CVE y entrepiso con propuesta de rehabilitación.

Fuente: elaboración propia

3.3. Análisis del comportamiento térmico-energético

3.3.1. Modelo estacionario

En primera instancia se analiza el comportamiento de la envolvente. Se calcula el coeficiente de transmitancia térmica K , a través del calculador CIDEE-EA (Fernández, Garzón y Elsinger, 2019), el cual responde al procedimiento expresado en la norma IRAM 11601. Una vez obtenido los valores K , se procede a compararlo con los niveles de confort térmico recomendados en la norma para la zona bioclimática II según la norma IRAM 11605 Nivel A: ecológico, Nivel B: recomendado, Nivel C: mínimo y Nivel A/B incorporado como un nivel intermedio por la modificación 1 de la norma IRAM 11900:2019.

Tabla 1. Coeficiente de transmitancia térmica de los distintos elementos de la envolvente.

Elemento constructivo	Caso original		Propuesta de rehabilitación	
	Coeficiente K [W/m ² K]	Nivel de confort higrotérmico	Coeficiente K [W/m ² K]	Nivel de confort higrotérmico
CVE	1.73	Nivel C	0.45	Nivel A
Entrepiso	3.26	-	0.58	-
CVI	2.14	-	0.46	-
Estructura H°A°	2.56	NO clasifica	0.47	Nivel AB

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a las superficies vidriadas se analiza su coeficiente K con la norma IRAM 11601, la cual determina valores para distintos tipos de soluciones. Se compara dicho valor con las clasificaciones establecida por IRAM 11507-4 para ventanas, según el coeficiente de transmitancia térmica de la superficie vidriada, que van desde K1 a K5, posicionándose como NO clasificable, aquellas que superan los valores máximos sugeridos (tabla 2). La carpintería de la situación original, vidrio común 4 mm sin protección, presenta un coeficiente K de 5,82 W/m²K se define como NO clasificable, mientras que la propuesta de rehabilitación, DVH, el K resultante es de 3,08 W/m²K.

Tabla 2. Categorías de aislación térmica de ventanas según transmitancia térmica.

Categoría de aislación	Transmitancia térmica K W/m ² K
K1	K < 1,0
K2	1,0 ≤ K ≤ 1,5
K3	1,5 < K ≤ 2,0
K4	2,0 < K ≤ 3,0
K5	3,0 < K ≤ 4,0
No clasificables	K > 4,0

Fuente: IRAM (2010).

Un puente térmico se define como la heterogeneidad de un elemento constructivo que forma parte de la envolvente de un edificio (pared, piso, techo, etc.) que ocasiona mayor flujo de calor a través de ésta, favoreciendo la condensación superficial (IRAM, 2002). Al disminuir la resistencia térmica respecto al resto de los cerramientos, los puentes térmicos se convierten en partes sensibles de los edificios donde aumenta la posibilidad de producción de condensaciones superficiales, en la situación de invierno o épocas frías (Díaz Regodón y Tenorio Ríos 2005).

En los puentes térmicos se produce un incremento de pérdidas y ganancias de calor. Para efectuar el cálculo y la verificación de los puentes térmicos, se utiliza el procedimiento de cálculo expresado en la norma IRAM 11605. Dicha norma expresa una relación entre la transmitancia térmica del puente térmico y la transmitancia térmica del muro. Cuando esta relación supera el valor de 1,5 se considera que existe un puente térmico.

$$\frac{k_{pt}}{k_m} \leq 1,5$$

Donde:

k_{pt}: transmitancia térmica del puente térmico

k_m: transmitancia térmica del muro

Para el caso analizado, se considera a la estructura puntual de hormigón como un puente térmico dentro del CVE de ladrillo cerámico hueco.

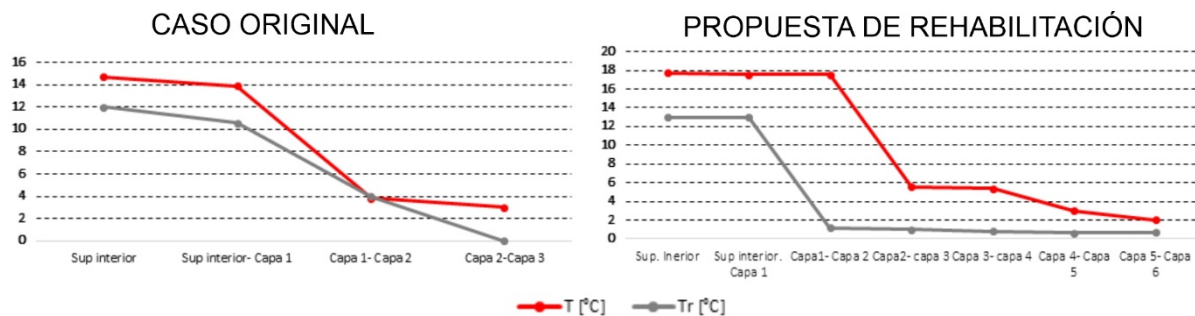
Tabla 3. Coeficiente de transmitancia térmica de los distintos elementos de la envolvente.

Elemento constructivo	Caso original			Propuesta de rehabilitación		
	Coeficiente K	Relación Kpt/Km	Verifica	Coeficiente K	Relación Kpt/Km	Verifica
Mampostería	1.70	1.51	NO	0.45	1.04	SI
Estructura H°A°	2.58			0.47		

Fuente: elaboración propia.

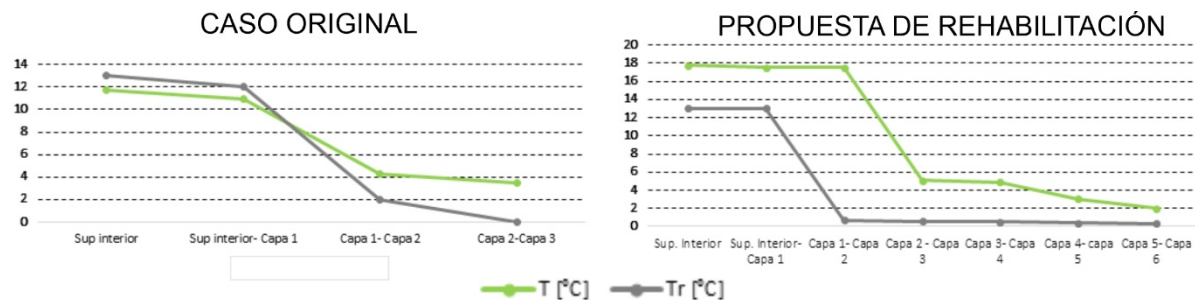
Para evaluar si es que existe o no riesgo de condensación tanto superficial como intersticial para todas las tecnologías constructivas exteriores expuestos anteriormente, se desarrolló el calculador C-RC (Fernández y Garzón, 2020) a partir del procedimiento y las definiciones expresadas en IRAM11625:2000. Se evalúa también los riesgos de condensación en la estructura de hormigón armado, que se constituyen como puentes térmicos del CVE.

Figura 5. Comparación entre temperatura de rocío y temperatura interior en las distintas capas de la mampostería exterior para la situación original y con propuesta de rehabilitación.



Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Comparación entre temperatura de rocío y temperatura interior en las distintas capas de la estructura de H°A° para la situación original y con propuesta de rehabilitación.



Fuente: elaboración propia.

Una vez analizado el comportamiento de la envolvente, se calcula el comportamiento térmico global de las unidades de manera estacionaria a partir del coeficiente volumétrico de calefacción y refrigeración.

La Norma IRAM 11604 establece el coeficiente volumétrico de calefacción, G_{cal} , como valores máximos admisibles según la ubicación geográfica de la unidad habitacional y su volumen interior. Este coeficiente G_{cal} es un parámetro global que pondera todos los elementos que intervienen en las pérdidas de calor de un edificio. La herramienta utilizada para determinar G_{cal} , es el calculador CIDEE-EA (Fernández et al. 2019). Para determinar el G_{cal} de las distintas unidades de la planta tipo, se toman 4 casos: unidades A y D, unidades B y C (idénticos), unidades E y H y unidades F y G.

La norma IRAM 11659-2 (2007) contempla el control de las ganancias térmicas totales intervinientes en una unidad habitacional. El parámetro global aquí definido que pondera todos los elementos que intervienen en el proceso, es el coeficiente volumétrico de refrigeración admisible (GR_{adm}). En este caso, a diferencia de G_{cal} , el cálculo contempla las orientaciones como variantes, es por ello que se toman 6 casos para las unidades de análisis: unidad A, unidades B y C, unidad D, unidad E, unidades F y G y unidad H.

Para determinar G_{cal} y GR , se emplea el calculador CIDEE-EA (Fernández et al. 2019). En la Tabla 4 se expresan los valores obtenidos.

Tabla 4. Coeficiente volumétrico de calefacción y refrigeración para ambos casos en comparación con valores admisibles.

	Caso original				Propuesta de rehabilitación			
	G_{cal}	$G_{cal-adm}$	GR	GR_{adm}	G_{cal}	$G_{cal-adm}$	GR	GR_{adm}
A	3,25	2,213	52,519	34,43	1,43	2,213	26,42	34,43
B y C	2,71	2,213	41,496	47,34	2,20	2,213	22,94	47,34
D	3,25	2,213	52,276	34,43	1,43	2,213	26,21	34,43
E	3,38	2,213	58,592	34,43	2,095	2,213	29,05	34,43
F y G	2,88	2,213	49,650	47,34	1,78	2,213	24,58	47,34
H	3,38	2,213	58,315	34,43	2,095	2,213	29,56	34,43

Fuente: elaboración propia.

A partir de este primer análisis, se verifica que, el caso original no cumple con ninguna de las disposiciones presentes en la normativa analizada. A partir de la propuesta de rehabilitación, se evidencian mejoras sustanciales en el comportamiento térmico del modelo estacionario, verificando con las normas locales.

3.3.2. Modelo estacionario con corrección dinámica

A partir del aplicativo en línea del Ministerio de Desarrollo productivo, se determina el IPE y se obtiene la etiqueta de eficiencia energética con su respectiva clasificación para las ocho unidades analizadas. Se define al IPE mismo cómo el índice del uso final de energía convencional que contribuye a la demanda energética de la vivienda mediante los siguientes servicios: la calefacción, la refrigeración, la iluminación artificial de interiores y el calentamiento de agua sanitaria, en KWh/m²año (IRAM, 2017). Para la ciudad de San Miguel de Tucumán, las clases de EE van desde <20 KWh/m²año, para la clase A hasta >201 KWh/m²año clase G (figura 5).

Figura 7. Rango de valores de IPE y clase de EE para San Miguel de Tucumán



Fuente: elaboración propia.

Para llevar a cabo el proceso de etiquetado, se cargaron los valores correspondientes a la materialidad del edificio, según lo indicado previamente. Se contemplan a las unidades B y C y F y G como idénticas entre sí. En la actualidad las unidades no cuentan con red de gas natural, por lo que se considera a la electricidad como único vector energético. Para calefacción y refrigeración, se simula un equipo de aire acondicionado tipo Split frío-calor. Para el caso de la iluminación, se tienen en cuenta los centros existentes, y artefactos de iluminación LED. En la situación particular de la generación de agua caliente sanitaria, el edificio cuenta con un sistema central, caso no contemplado para el cálculo. Es por ello que no se carga ningún sistema de agua caliente en el aplicativo, y se deja que el mismo estime un consumo por defecto.

Tabla 5. IPE y clase de EE para las distintas unidades del caso original y con propuesta de rehabilitación.

	Caso original		Propuesta de rehabilitación		% Mejora
	IPE KWh/m ² año	Clase EE	IPE KWh/m ² año	Clase EE	
Unidad A	284	G	108	D	61,9
Unidad B y C	150	E	99	D	34
Unidad D	306	G	110	D	64,05
Unidad E	275	G	111	D	59,63
Unidad F y G	160	F	100	D	37,5
Unidad H	290	G	113	D	61,03

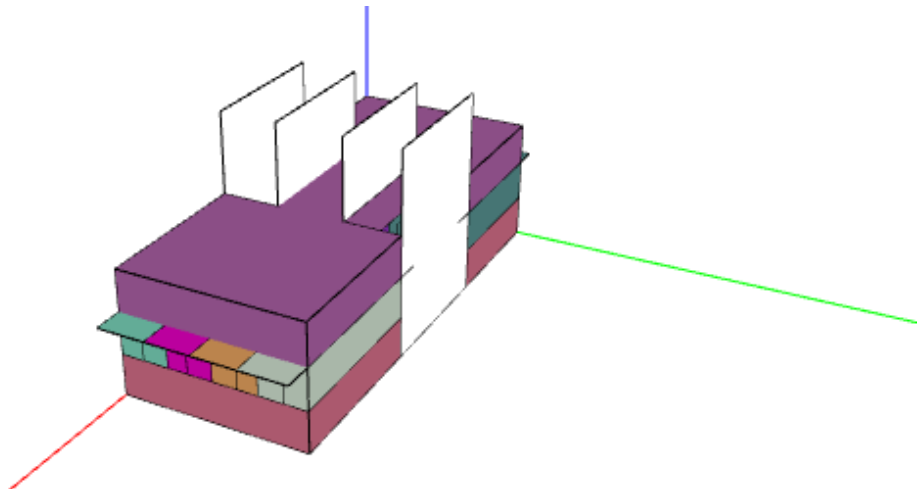
Fuente: elaboración propia.

En la tabla 5, se exhiben los valores de IPE obtenidos para cada unidad, con su respectiva clase de EE. En la situación original, para las unidades A, D, E y H se obtiene un IPE superior a 201 KWh/m²año, posicionándolas en la clase G, es decir el nivel más bajo de eficiencia energética. Para los casos F y G, se obtiene una clasificación F y para B y C una E. Esto evidencia posiciones en los rangos más bajos de la etiqueta establecida para San Miguel de Tucumán. Las unidades de un ambiente (B, C, F y G) evidencian un mejor desempeño energético, esto se debe a la menor cantidad de superficie adyacente al espacio exterior. Cabe destacar que hay una importante diferencia entre los IPE obtenidos para las distintas unidades del caso existente, de hasta el 100 %.

Para la propuesta de rehabilitación, los valores IPE obtenidos para las distintas unidades, resultan muy similares entre sí, con una diferencia inferior al 15 %. En todos los casos, la clase de EE obtenida es D.

3.3.3. Modelo dinámico

Para generar el modelo de simulación del edificio, se lo simplifica a tres niveles. En esta simplificación, el nivel central corresponde a la planta tipo con las ocho unidades analizadas en el presente trabajo. Se genera una zona térmica para cada una de las unidades habitacionales (unidad A a unidad H) otra para el sector de palier y un nivel superior e inferior como únicas zonas térmicas simulando el piso 6 y 8 (Figura 8).

Figura 8. Modelo de simulación definido por zonas térmicas.

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a las superficies se definen las exteriores para cada zona térmica. Se definen las ventanas como tales. Para simular las sombras proyectadas por los balcones se generan aleros sobre cada una de las unidades. Se crean parantes verticales exteriores para simular las medianeras e interiores para simular la proyección del edificio en altura. Se cargan valores de materialidad correspondientes a aquellos descritos previamente con las propiedades térmicas definidas por las normas IRAM.

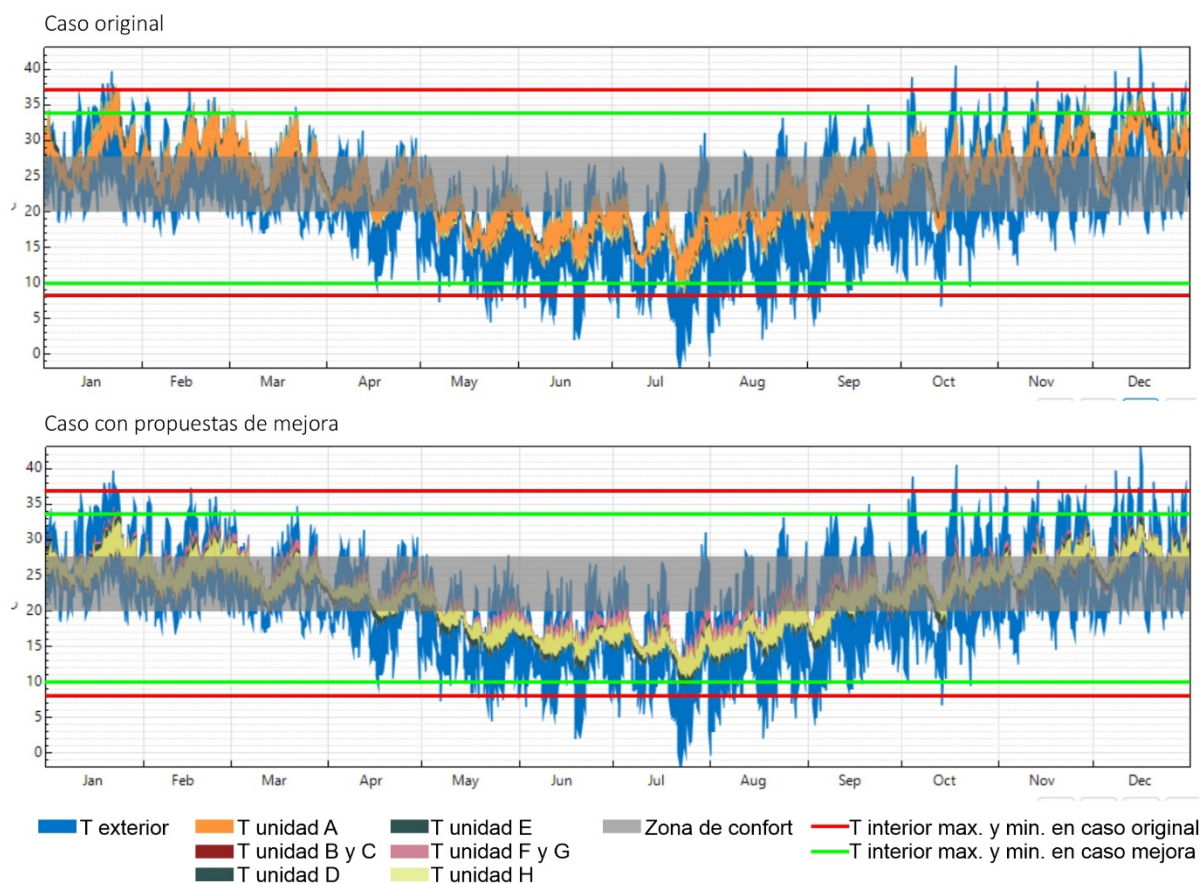
Como el objetivo es conocer la temperatura interior sin acondicionamiento artificial, no se considera ningún tipo de sistema activo de calefacción ni de refrigeración encendido. Tampoco se considera la aplicación de estrategias de refrigeración o calefacción pasivas por parte del usuario (como ser apertura de ventanas).

Se obtiene como resultado la temperatura interior de cada local. Se analiza de manera comparativa dichos valores con la temperatura del aire exterior. Debido al clima mixto se estudia por separado el verano e invierno.

Como resultado final de este trabajo de simulación térmica, se procede a comparar los resultados del caso original con los de las propuestas de mejora. En la figura 9 se exhiben los gráficos de temperatura par ambos casos de manera comparativa. La franja gris, marca la zona de confort teórica adoptada, la línea roja indica los rangos de temperatura (máxima y mínima) existentes en el caso original y la línea verde los rangos de temperatura de la propuesta de mejora. A partir de allí, puede distinguirse

de manera clara como, a partir de las propuestas de mejoras, la temperatura interior se aproxima más a la zona de confort.

Figura 9. Comparación de valores de temperatura interior y exterior para caso original y con propuesta de rehabilitación.

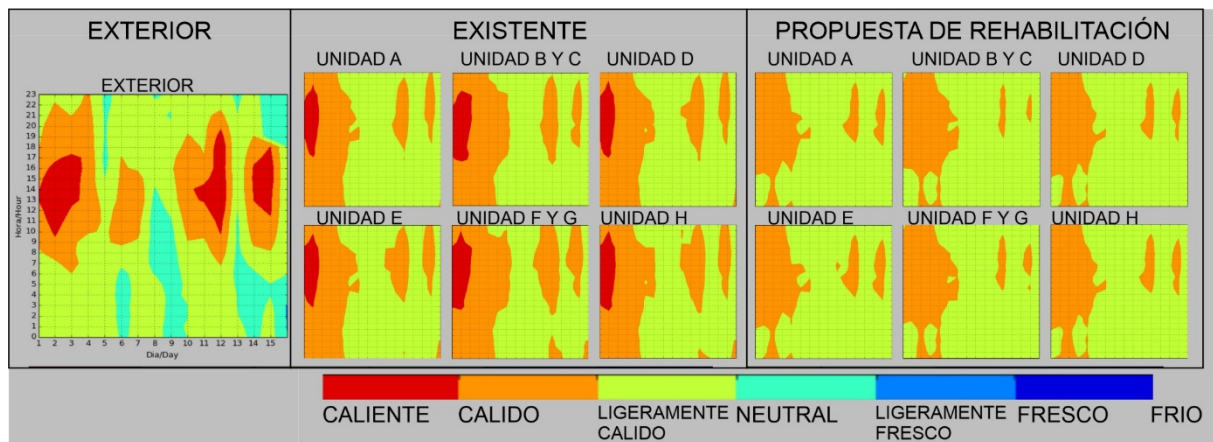


Fuente: Elaboración propia.

Se realiza el análisis del confort térmico según el estándar ANSI/ASHRAE 55 a partir del software SIMEDIF, en su última versión, 2.0. para ello, se emplean los datos de temperatura y humedad relativa registrados obtenidos a partir de la simulación térmica efectuada con EnergyPlus, suponiendo que la temperatura operativa es similar a la temperatura calculada. Se analiza el PMV.

La imagen 10, muestra los resultados de PMV para la situación de verano. Allí se evidencia una sensación de confort mejorada, para la propuesta de rehabilitación, donde se elimina por completo la sensación *caliente*.

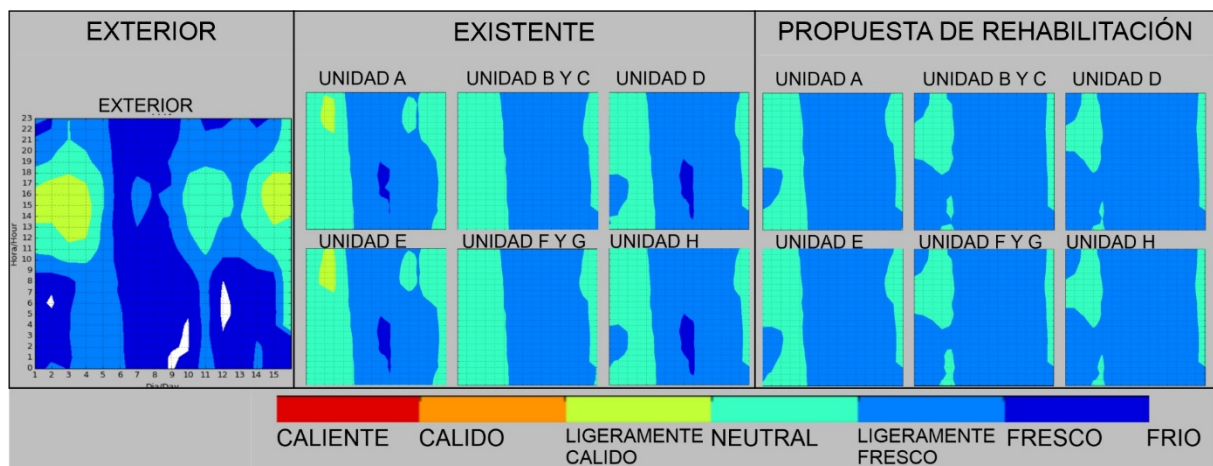
Figura 10. PMV en verano para caso original y con propuesta de rehabilitación.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 11, se evidencia el cambio en la situación confort durante el invierno. En la propuesta de rehabilitación, se eliminan por completo la sensación de frío y solo se perciben sensaciones neutral y ligeramente fresco. Sin embargo, cabe mencionar que disminuye la sensación neutral con respecto a la situación original.

Figura 11. PMV en invierno para caso original y con propuesta de rehabilitación.



Fuente: Elaboración propia.

4. Discusiones

Cada una de las estrategias de rehabilitación propuestas, puede ser aplicada de manera aislada generando un impacto positivo en el desempeño térmico energético del edificio con un presupuesto más reducido. La adopción de un análisis independiente de cada una de ellas queda pendiente para un estudio a futuro, esto

permitirá dar un orden de prioridad desde el punto de vista de su impacto en la eficiencia energética global como así también en el costo de la intervención.

5. Conclusiones

El edificio analizado en el presente trabajo corresponde a una solución constructiva típica de edificios en altura presentes en la ciudad de San Miguel de Tucumán. Asimismo, este tipo de edificios continúa reproduciéndose, no solo es las zonas de alta densidad de la ciudad sino también en otras zonas residenciales de mediana y baja densidad, lo cual indicaría la continuidad del modelo en los próximos años.

En este caso de estudio, se evidencia una edificación sin criterios de sustentabilidad. Sus propiedades térmicas no verifican con las normas locales (IRAM). La clase de EE obtenida corresponde a las dos categorías más deficientes. El estado de confort interior en las estaciones críticas (analizada a partir de un modelo de simulación dinámico) determinan una situación de inconfort. Esto implica un alto consumo energético y emisiones de gases de efecto invernadero. La propuesta de rehabilitación efectuada, genera una mejora sustancial en prácticamente todos los ítems mencionados, a excepción del confort en invierno, donde se eliminan las sensaciones neutras. Sin embargo, no llega a alcanzar los mejores niveles de eficiencia energética, por lo que debe continuar indagando sobre otras alternativas de diseño y tecnológicas para alcanzarlos.

Las edificaciones sustentables están poniéndose en auge a nivel mundial, existen premios e incentivos a las construcciones sustentables, a la vez que este concepto les otorga un valor agregado. Por otro lado, una edificación sustentable supone un ahorro energético a lo largo de su vida útil que lo volvería, a mediano plazo más económico. Sin embargo, en nuestro medio, la lógica del mercado inmobiliario de edificios residenciales, tiende a construir para la venta de unidades a inversores cuyo destino final será la renta de los inmuebles. Esta "lógica" da lugar a edificaciones deficientes. Actualmente el interés está específicamente puesto en los tiempos de construcción y cantidad de unidades. Las unidades habitacionales, son cada vez menos confortables desde el punto de vista térmico. Frente a este escenario, resulta fundamental una intervención del estado que no permita bajar los estándares de calidad ambiental en las construcciones.

Si bien es sabido que cuanto antes se incorporen estrategias de eficiencia energética, en la etapa de proyecto, resultan menos costos y más beneficiosos. Resulta importante plantear estrategias para rehabilitar edificios existentes, como alternativa para la sustentabilidad y el confort de la multiplicidad de edificios en altura presentes en la ciudad de SMT.

6. Referencias

Cutruneo, J. P. (2012). Hacia el edificio de renta. La transformación de la vivienda en altura en manos de los arquitectos (Rosario, 1920-1948). *Dearq*, (10), 152–161. doi: 10.18389/dearq10.2012.14

Elsinger, D., Fernández, A., y Garzón, B. (2020). Calculador integral de eficiencia energética de la envolvente arquitectónica: CIDEE-EA. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 24, 77-88.

Guijarro, J. L., Ajmat, R. F., Soldati, M. E., & De Innocentiis, L. M. (2012). Relevamiento de edificios en altura en San Miguel de Tucumán. Su envolvente y condiciones ambientales. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16, 149-156.

Kolaitis, Dionysios I. Malliotakis, Emmanouil; Kontogeorgos, Dimos A.; Mandilaras, Ioannis; Katsourinis, Dimitrios I. y Founti, Maria A. (2013). Comparative assessment of internal and external thermal insulation systems for energy efficient retrofitting of residential buildings. *Energy and Buildings*. 64, 123-131.

Kuchen, E., y Kozak, D. (2021). Transición energética Argentina. El nuevo estándar de eficiencia energética en la evaluación de la vivienda social. Caso de estudio: vivienda de barrio Papa Francisco. *Revista hábitat sustentable*, 10(1), 44-55.

Nikolaidis, P.A. Pilavachi, A.A. Chletsis. (2009) Economic evaluation of energy saving measures in buildings. *Applied Energy*, 86(12), 2550–2559.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2002). *Acondicionamiento térmico de edificios. Vocabulario (NORMA IRAM 11549)*. IRAM.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo (2002). *Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario (NORMA IRAM 11601)*. IRAM.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Acondicionamiento térmico de edificios (2001). *Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en calefacción. Coeficiente volumétrico G de pérdidas de calor. Cálculo y valores límites (NORMA IRAM 11604)*. IRAM.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2002). *Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios (NORMA IRAM 11605)*. IRAM.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2000). *Verificación del riesgo de condensación por vapor de agua (NORMA IRAM 11625)*. IRAM

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Acondicionamiento térmico de edificios (2007). *Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en refrigeración (NORMA IRAM 11659-2)*. IRAM

Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2019). *Modificación N°1 a la Norma IRAM 11900:2017-12 (NORMA IRAM 11900)*. IRAM

Papadopoulos, A. M. (2005). State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and buildings*, 37(1), 77-86.

Rivero Camacho, C.; Pereira, J.; Gomes, M. G. y Marrero, M. (2018). Huella de carbono como instrumento de decisión en la rehabilitación energética. Películas de control solar frente a la sustitución de ventanas. *Revista hábitat sustentable*, 8(2), 20-31. <https://dx.doi.org/10.22320/07190700.2018.08.02.02>

Tommerup, S. (2006). Energy savings in Danish residential building stock. *Energy and Buildings*, 38,618–626.

Urteneche, E.; Martini, I.; Barbero, D. A. y Discoli, C. A. (2021) Estado del arte de la envolvente edilicia del subsector salud en la Microrregión Gran La Plata: Su estudio como punto de partida para el mejoramiento de la eficiencia energética a partir del reciclado edilicio; Asociación Argentina de Energía Solar; *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 25, 49-59.

Viegas, G. M., Barbero, D. A., Chévez, P. J., Martini, I., & Discoli, C. A. (2020). Reciclado masivo de la envolvente urbano-edilicia basado en procesamiento digital de imágenes, La Plata, Argentina. *Revista de Urbanismo*, 43, 151. <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2020.57522>